

FRP 와이어 보강 콘크리트 공시체의 압축거동

조백순* · 이종한** · 최은수***

Cho, Baiksoon*, Lee, Jong-Han**, Choi, Eunsoo***

Axial Behavior of Concrete Cylinders Confined with FRP Wires

ABSTRACT

The application of FRP wire as a mean of improving strength and ductility capacity of concrete cylinders under axial compressive load through confinement is investigated experimentally in this study. An experimental investigation involves axial compressive test of three confining amounts of FRP wire and three concrete compressive strengths. The effectiveness of FRP wire confinement on the concrete microstructure were examined by evaluating the internal concrete damage using axial, circumferential, and volumetric strains. The axial stress-strain relations of FRP wire confined concrete showed bilinear behavior with transition region. It showed strain-hardening behavior in the post-cracking region. The load carrying capacity was linearly increased with increasing of the amount of FRP wire. The ultimate strength of the 35 MPa specimen confined with 3 layer of FRP wire was increased by 286% compared to control one. When the concrete were effectively confined with FRP wire, horizontal cracks were formed by shearing. It was developed from sudden expansion of the concrete due to confinement ruptures at one side while the FRP wire was still working in hindering expansion of concrete at the other side of the crack. The FRP wire failure strains obtained from FRP wire confined concrete tests were 55 ~ 90%, average 69.5%, of the FRP wire ultimate uniaxial tensile strain. It was as high as any other FRP confined method. The magnitude of FRP wire failure strain was related to the FRP wire effectiveness.

Key words : FRP wire, Concrete confinement, Effective FRP wire failure strain, Effectiveness of confinement, Zero volumetric strain, Stress-hardening behavior

초 록

콘크리트 공시체의 압축강도와 연성성능을 향상시키기 위하여 FRP 와이어의 적용을 실험적으로 연구하였다. 와이어 보강겹수와 콘크리트 압축강도의 변화가 고려된 와이어 보강 공시체의 압축실험을 실시하였다. FRP 와이어 보강 공시체 압축실험에서 측정된 축방변형률, 원주방향 변형률, 체적변형률에 의한 와이어 내부 콘크리트의 손상상태를 분석하여 와이어 보강효과를 평가하였다. FRP 와이어 보강 공시체의 응력-변형률 선도는 두 개의 직선구간과 변형구간으로 구성된 것으로 측정되었으며, 균열이후구간에서 응력상승거동하였다. 와이어 보강 공시체의 균열강도와 최대강도는 와이어 보강겹수에 비례하여 증가하는 것으로 평가되었다. 와이어가 3겹 보강된 35 MPa 공시체의 최대강도는 무보강 공시체의 압축강도보다 286% 높게 측정되었다. FRP 와이어 보강 공시체의 내부 콘크리트 파괴형태는 i) 수직균열 또는 경사균열파괴; ii) 수평균열파괴로 구분되었다. 특히, 수평균열파괴는 와이어에 의한 구속약화로 인하여 갑자기 내부 콘크리트가 팽창하는 부분과 와이어가 아직 내부 콘크리트를 효과적으로 구속하는 부분의 전단효과로 발생하였으며, 수평균열은 공시체의 중앙부를 기준으로 여러 면으로 발생하였으며, 와이어에 의한 구속효과가 우수한 공시체에 발생하였다. FRP 와이어 보강 공시체 압축실험에서 와이어 최대파단변형률에 대한 인장파단변형률의 비가 55-90%로 측정되었으며, 평균 69.5%로 나타났다. 이는 일반 FRP 시트 보강 공시체 실험에서 측정된 시트 파단변형률보다 다소 높은 값으로 FRP 와이어 보강 공법의 우수성을 입증한다.

검색어 : FRP 와이어, 보강 콘크리트 공시체, FRP 와이어 파단변형률, FRP 와이어 보강효과, 재료체적변형률, 응력상승거동

* 정희원 · 인제대학교 건설기술연구소 토목도시공학부 부교수 (civcho@inje.ac.kr)

** 정희원 · 교신저자 · 대구대학교 토목공학과 조교수 (Corresponding Author · Daegu University · jonghan@daegu.ac.kr)

*** 정희원 · 홍익대학교 토목공학과 부교수 (eunsoochoi@hongik.ac.kr)

Received May 28, 2013/ revised June 17, 2013/ accepted July 16, 2013

1. 서론

최근에 섬유강화복합재료(fiber reinforced polymers, FRP)는 기존 건설재료를 대체할 수 있는 새로운 재료로 인식되고 있으며, 콘크리트 구조물의 보수 또는 보강에 아주 효과적인 재료로 각광받고 있다. 철근콘크리트 휨부재의 인장축에 FRP를 부착시킨 FRP 보강 휨부재의 강도 및 강성의 향상은 국내·외의 많은 논문에 의해 규명되었다(Bencardino et al., 2002; El-Refaeie et al., 2003; Brena et al., 2003). 그러나 FRP의 조기탈락에 의한 FRP 보강 휨부재의 연성 감소는 FRP 보강방법의 적용을 제한시킨다. 조백순 등(2010)은 콘크리트 압축변형률이 0.003에 도달하기 전에 FRP가 조기탈락하면, FRP 보강 휨부재의 공칭휨모멘트 산정에 강도설계법을 적용하는 것은 무리가 있을 수 있다고 보고하였다. FRP 보강 휨부재와는 달리, 콘크리트 압축부재의 외부에 FRP를 부착시킨 FRP 보강 압축부재는 강도, 연성, 변형률 저항능성이 모두 크게 향상되는 것으로 보고되었다(Demers and Naela 1999; Chaallal et al. 2003; Bisby et al. 2005; Matthys et al. 2005).

콘크리트 압축부재를 둘러싼 FRP는 내부 콘크리트의 팽창을 구속하여 압축부재의 성능을 향상시킨다. 낮은 압축응력이 작용되어 내부 콘크리트의 축방향 변형률이 낮은 단계에서는 원주방향 변형률(FRP에는 인장변형률)은 매우 낮은 상태이다. 이 단계에서는 FRP에 의한 내부 콘크리트의 구속력이 매우 낮아 FRP 보강 압축부재의 성능은 거의 향상되지 않는다. 내부 콘크리트의 응력이 콘크리트의 압축강도에 근접하면, 내부 콘크리트에 균열이 발생되며 팽창한다. FRP는 내부 콘크리트의 팽창을 제어하는 수동적인 역할(passive action)을 하며, FRP 보강 콘크리트 압축부재의 응력-변형률 거동은 FRP에 의한 횡방향 구속력에 큰 영향을 받는다. FRP에 의한 구속효과는 FRP 종류, FRP 양, 콘크리트와 FRP 사이의 접착력, FRP 체결방법 등 FRP 보강시스템에 의해 결정된다. FRP 구속효과는 FRP 보강 콘크리트 압축부재 실험에서 측정된 FRP 파단변형률의 크기와 긴밀한 관계가 있다.

FRP에 의한 내부 콘크리트의 팽창제어 작용은 콘크리트와 FRP의 완벽한 부착에서 시작된다. Harries and Carey(2003)는 콘크리트 압축부재와 FRP 사이의 완벽하지 못한 부착은 FRP에 의한 구속효과를 지연시켜 FRP 보강 압축부재의 성능에 영향을 미치는 것을 실험으로 규명하였다. 콘크리트와 보강재의 완벽한 부착을 위하여 프리스트레스를 도입하는 방법이 제안되었다. Xiao and Ma(1997)은 FRP 외부에 벨트를 이용하여 FRP 보강 압축부재에 프리스트레스를 도입하는 방법을 제안하였고, 최근에는 Choi et al.(2009, 2010)은 강제 외부에 압력을 가하여 강제 보강 압축부재에 프리스트레스를 도입하는 방법을 제안하였다. Harries and Kharel(2002)과 Harries and Carey(2003)은 콘크리트와 보강재

인 강제 또는 FRP 사이의 틈의 완벽한 해결의 어려움을 부각시켰다.

이 연구는 프리스트레스를 도입한 와이어 형태(wire type)의 FRP를 콘크리트 압축부재에 부착시켜 내부 콘크리트의 구속효과를 극대화하는 FRP 와이어 보강 압축부재의 역학적 특성을 고찰하였다. 이를 위하여 FRP 와이어 보강접수, FRP 와이어 보강방법, FRP 와이어 접착방법, 그리고 콘크리트 압축강도가 고려된 체계적인 FRP 와이어 보강 콘크리트 압축부재의 압축실험을 실시하였다. FRP 와이어 보강 압축부재의 압축실험에서 측정된 응력-축방향 변형률 선도, 응력-원주방향변형률 선도, 체적변형률, 체적변형률-축방향변형률 선도, 균열강도, 최대강도, 최대강도 도달 변형률, 재료체적변형률, FRP 와이어 파단변형률 등을 분석하여 콘크리트 압축부재에 대한 FRP 와이어 보강방법의 적용 타당성을 살펴보았다. 이 논문에서 연구된 FRP 와이어로 보강된 압축부재의 압축실험 결과는 기존 콘크리트 압축부재에 대한 보강방법으로 FRP 와이어 보강방법을 적용할 수 있는 기술적 배경을 제공할 것으로 판단된다.

2. FRP 와이어 보강 콘크리트 공시체 제작과 압축실험

2.1 FRP 와이어 보강 콘크리트 공시체 제작

FRP 와이어 보강 콘크리트 압축부재의 압축성능을 고찰하기 위하여 지름 150 mm, 높이 300 mm인 콘크리트 원주형 공시체의 외부에 FRP 와이어가 감긴 FRP 와이어 보강 콘크리트 공시체를 제작하였다. 이 연구에 사용된 와이어는 지름 1.0 mm인 유리섬유 FRP이다. FRP 와이어의 인장강도는 1230.6 MPa, 파단변형률은 0.0294, 탄성계수는 41.84 GPa이다. Fig. 1(a)는 틀에 감겨있는

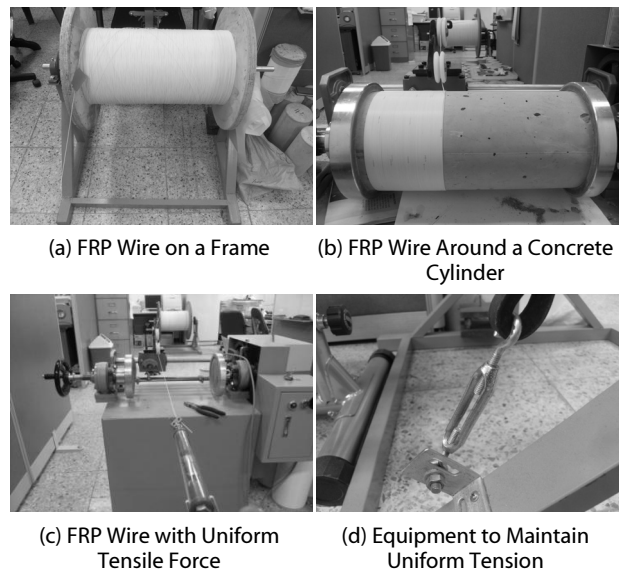


Fig. 1. A Process of Introducing Uniform Tensile Force to FRP wire

FRP 와이어 사진이다. Fig. 1(b)는 특별히 제작된 와이어 감는 기구를 이용하여 일정한 간격을 유지하며 FRP 와이어를 콘크리트 공시체에 감는 광경이다. 이 단계에서 접착제는 아직 도포되지 않았다. 공시체에 와이어를 감을 때 스프링으로 구성된 기구를 이용하면 와이어에 일정한 인장력을 유지시켰다(Fig. 1(c) 참조). Fig. 1(d)는 와이어에 일정한 인장력을 유지시키는 기구의 사진이다. 이 연구에서는 와이어에 인장력 25 N을 작용시켰으며, 와이어에

작용된 인장응력은 31.83 MPa이며, 변형률은 0.000773이다. 인장 응력 31.83 MPa은 공시체에 구속력은 작용시키지 않으며, 공시체와 와이어를 틈이 없이 감기계 하는 충분한 압력이다. 또한, FRP 와이어를 감을 때 와이어 중심간 거리를 1 mm로 하여 와이어와 와이어 사이 틈이 없게 와이어를 공시체에 부착하였다. 와이어를 감는 동안 와이어의 풀림을 방지하기 위하여 와이어의 끝부분에 특수 접착제를 발라 공시체에 부착시켰다. 공시체에 와이어를 감는 과정을 Fig. 2에 나타내었다. 와이어를 공시체의 상·하 단부 10 mm를 제외한 전구간 280 mm에 부착하여 와이어 보강 시험체의 끝부분 효과(end effect)를 제거하였다. 와이어 감는 작업이 끝나면 와이어 양 끝 부분에 접착제를 도포하여 와이어를 공시체에 정착시켰다. 제안된 와이어 보강작업은 겹층으로 시공 가능하며, Fig. 3은 공시체에 와이어가 1~3겹 부착된 사진이다.

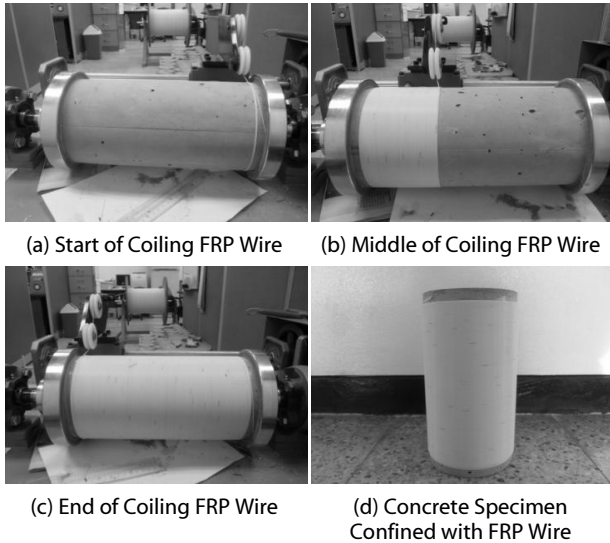


Fig. 2. A View of Coiling FRP Wire Around a Concrete Cylinder

콘크리트 공시체에 대한 FRP 와이어의 보강효과를 고찰하기 위하여 세 종류의 콘크리트 압축강도(35, 45, 55 MPa) 그리고 세 종류의 와이어 보강겹수(1, 2, 3겹)를 선택하였다. 무보강 기준 공시체는 각각 3개씩, 보강 공시체는 각각 2개씩, 합계 27개 FRP 와이어 보강 공시체에 대한 압축실험을 실시하였다. FRP 와이어 보강 공시체 실험일람표를 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험방법

2,000 kN 용량의 재료시험기를 사용하여 FRP 와이어 보강 콘크리트 공시체의 압축실험을 실시하였다. 상·하 2개의 가압판



Fig. 3. Concrete Cylinders Confined with FRP Wire

Table 1. Summary of Experimental Specimens

Layers of FRP wire	Compressive strength of concrete (MPa)		
	35	45	55
0	3	3	3
1	2	2	2
2	2	2	2
3	2	2	2

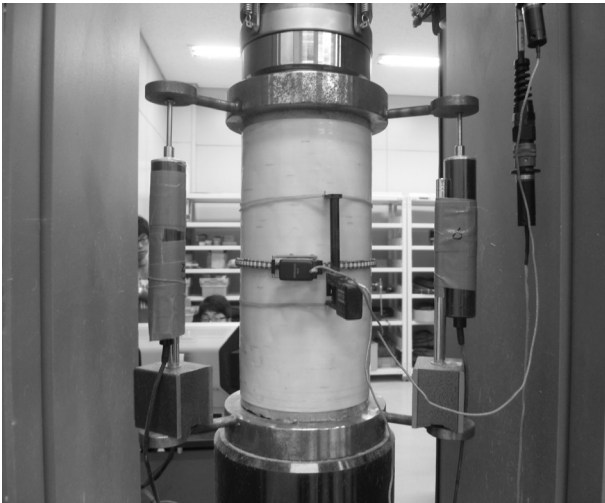


Fig. 4. An Axial Compressive Test of a Concrete Cylinder Confined with FRP Wire

사이에 지름 150 mm, 높이 300 mm인 공시체를 설치하여 압축력을 작용시켰다. 하중가력은 재료시험기의 변위계를 2.0 mm/min.의 속도로 공시체가 파괴될 때까지 가력하였다. 가압판과 가압판 사이에 3개의 변위계(LVDT)를 120° 간격으로 설치하여 공시체의 축방향 변위를 측정하였다. 3개의 변위계에서 측정된 변위의 평균값을 공시체의 축방향 변위로 사용하였다. 또한, 측정길이가 200 mm인 익스텐소미터(extensometer)를 공시체의 중앙에 설치하여 축방향 변위를 측정하였다. FRP 와이어 보강 콘크리트 공시체의 원주방향변형률과 공시체의 횡방향으로 부착된 와이어의 인장변형률을 측정하기 위하여 체인 형태로 특수 제작된 원주방향 변위측정기를 사용하였다. Fig. 4는 공시체의 축방향 변위계와 원주방향 변위측정기가 설치된 FRP 와이어 보강 콘크리트 공시체의 압축시험광경 사진이다.

3. FRP 와이어 보강 콘크리트 공시체 압축실험 결과 및 논의

3.1 응력-변형률 선도

FRP 와이어 보강 공시체와 무보강 공시체의 압축실험에서 측정된 응력-축방향변형률($f_c - \epsilon_a$) 선도과 응력-원주방향변형률($f_c - \epsilon_c$) 선도를 Fig. 5에 도시하였다. 축방향변형률 ϵ_a 는 압축을 나타내며, 원주방향변형률 ϵ_c 은 인장을 나타낸다. 축방향변형률은 균열강도 도달 이전구간에는 익스텐소미터(extensometer)에서 측정된 변위를 사용하였으며, 균열강도 이후구간에서는 변위계(LVDT)에서 측정된 변위를 사용하였다. 원주방향변형률은 체인 형태로 특수 제작된 원주방향 변위측정기에서 측정된 변위를 사용하였다. 그림의 (a), (b), (c)는 각각 콘크리트 압축강도가 35, 45,

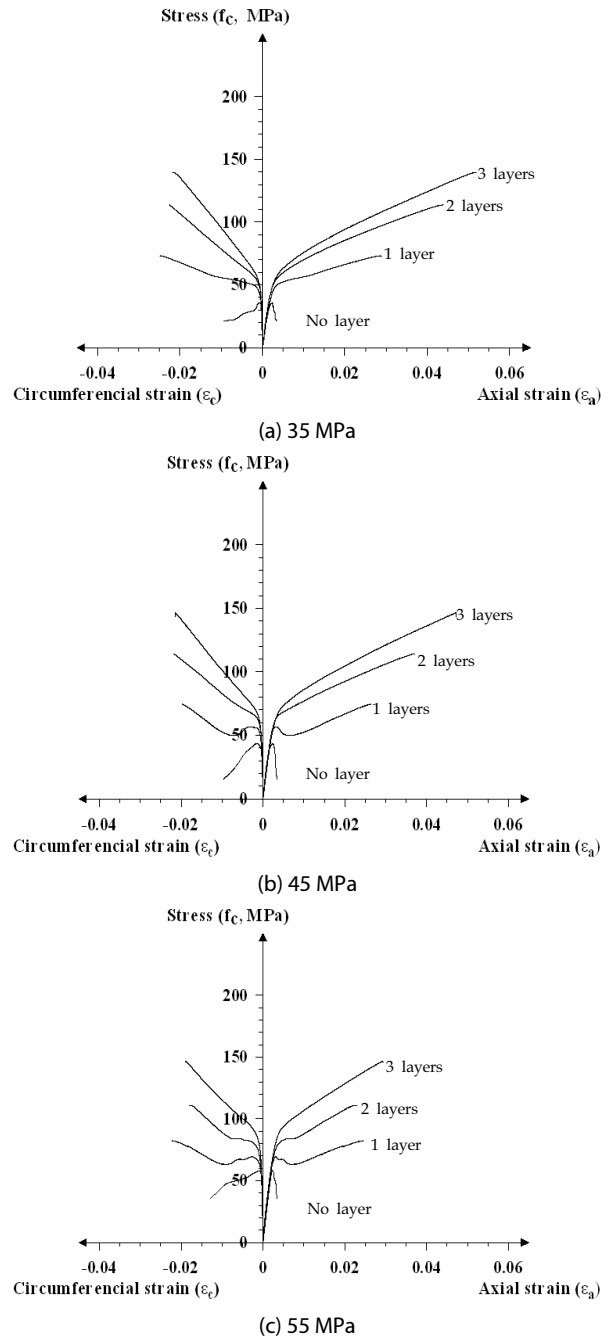


Fig. 5. Circumferential and Axial Stress-Strain Curves of Concrete Confined with FRP Wire

55 MPa인 와이어 보강 공시체의 실험결과이다.

무보강 공시체의 응력-축방향변형률 선도는 일반 콘크리트와 같이 압축강도 도달 후 응력이 감소하는 응력감소거동(stress-softening behavior)을 하였다. 이와는 달리 와이어 보강 공시체의 응력-축방향변형률 선도는 균열강도 f_o 도달 후, 파괴에 도달할 때까지

응력은 지속적으로 증가하여 응력상승거동(stress-hardening behavior)을 하였다. 와이어 보강 공시체의 응력-축방향변형률 선도는 균열강도를 기준으로 두 개의 직선구간으로 구성된 것으로 볼 수 있다. 균열강도 도달 후 응력-축방향변형률 선도의 기울기 감소는 와이어로 둘러싸인 내부 콘크리트 균열로 축강성이 감소하였기 때문이다. 첫째 직선구간인 균열이전구간에서 무보강 공시체와 와이어 보강 공시체의 기울기는 거의 같은 것으로 나타나 와이어는 공시체의 축강성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 평가된다. 그러나 와이어 보강접수가 증가할수록 와이어 보강 공시체의 균열강도는 증가되어 와이어는 공시체의 균열강도에 영향을 미치는 것으로 평가된다. 두 번째 직선구간인 균열이후구간에서 와이어 보강 공시체는 와이어에 의한 내부 콘크리트 구속으로 파괴에 도달할 때까지 변형률 증가에 대해 응력은 지속적으로 증가하였으며, 보강접수가 증가할수록 축강성도 증가하였다. 와이어 보강 공시체의 파괴 축방향변형률은 와이어 보강접수가 많을수록 그리고/또는 콘크리트 압축강도가 낮을수록 높게 측정되었다. 와이어 3겹이 보강된 35 MPa 공시체에서 측정된 파괴 축방향변형률은 0.055로 측정되어 무보강 공시체의 파괴 축방향변형률보다 10배 이상 큰 것으로 평가되었다. FRP 와이어는 콘크리트를 구속시켜 공시체의 하중저항성능과 변형저항 성능이 크게 향상시켰으며, 특히 에너지 흡수 성능을 매우 크게 향상시켰다. 이 구간에서 와이어 보강 콘크리트 공시체의 성능은 거의 와이어에 의해 결정되며, 와이어에 의한 보강효과가 탁월하게 구현되었다.

응력-원주방향변형률 선도는 응력-축방향변형률 선도와 마찬가지로 균열강도를 기준으로 2개의 직선구간으로 구성된 것으로

평가할 수 있다. 균열이전구간에서는 동일한 응력수준에서 원주방향변형률은 축방향변형률보다 작게 측정되었다. 이는 와이어로 둘러싸인 내부 콘크리트는 거의 팽창하지 않은 상태이며, 축방향변형률과 원주방향변형률은 포아송비와 관계가 있기 때문이다. 균열이후구간에서는 내부 콘크리트에 균열이 발생되고 팽창되어 원주방향변형률의 증가속도는 증가하였다. 콘크리트 압축강도가 작은 와이어 보강 공시체의 원주방향변형률은 축방향변형률보다 증가속도가 작은 것으로 측정되었다. 그러나 콘크리트 압축강도가 큰 55 MPa 와이어 보강 공시체의 원주방향변형률과 축방향변형률의 증가속도는 거의 비슷한 것으로 측정되었다. FRP 와이어 보강 공시체의 압축실험에서 측정된 최대원주방향변형률 ϵ_{uc} 는 보강접수 그리고 공시체 콘크리트 압축강도에 관계없이 약 0.02 정도로 측정되었다. Mirmiran and Shahawy(1997), Spoelstra and Monti(1999), Moran and Pantelides(2002)는 FRP 보강 콘크리트 압축부재의 응력-변형률 선도에서 원주방향변형률의 중요성을 지적하였다.

Table 2에 FRP 와이어 보강 공시체 실험에서 측정된 균열강도 f_o , 균열강도 도달 축방향변형률 ϵ_o , 최대강도 f_{cc} 와 최대강도 도달 축방향변형률 ϵ_{ua} 를 정리하였다. 균열강도는 내부 콘크리트의 균열 발생으로 응력-축방향변형률 선도의 기울기가 급변할 때의 응력이며, 최대강도는 실험에서 측정된 최대응력이다. Fig. 6에 와이어 보강 공시체의 균열강도와 와이어 보강접수의 관계를 도시하였다. 각 선들은 서로 다른 콘크리트 압축강도에 대한 균열하중을 직선회귀 분석한 결과이다. 압축강도 55 MPa인 공시체의 기울기가 제일 크고, 다음으로 압축강도 35 MPa인 공시체, 마지막으로 압축

Table 2. Results of Axial Compressive Tests on the Specimens

Compressive Strength (MPa)	Layers	f_o^* (MPa)	ϵ_o^{**}	f_{cc} (MPa)	ϵ_{ua}	ϵ_{avo}	ϵ_{uc}	ϵ_{uv}	$\frac{f_{cc}}{f_{co}}$
35	0	36.09	0.002322	—	0.004465	0.002570	-0.009340	-0.015130	—
	1	48.84	0.003002	73.53	0.029286	0.003002	-0.025727	-0.022169	2.037
	2	57.12	0.004112	113.15	0.044152	0.004112	-0.022912	-0.001671	3.135
	3	64.20	0.005458	139.37	0.052957	0.005458	-0.021549	0.009859	3.861
45	0	47.16	0.002514	—	0.003713	0.002427	-0.015158	-0.026602	—
	1	56.32	0.002716	74.82	0.026811	0.002716	-0.021636	-0.016461	1.586
	2	64.28	0.003411	107.85	0.031822	0.003411	-0.019341	-0.006861	2.287
	3	74.78	0.005333	144.69	0.047519	0.005333	-0.021024	0.005470	3.068
55	0	57.10	0.002288	—	0.003106	0.002421	-0.011926	-0.020746	—
	1	67.69	0.002634	78.81	0.024524	0.002634	-0.022978	-0.021431	1.380
	2	79.34	0.003630	109.98	0.024167	0.003630	-0.017625	-0.011083	1.926
	3	88.63	0.004019	144.52	0.027732	0.004019	-0.017544	-0.007355	2.531

* Average of three test results for the non-confined specimen and that of two test results for the confined specimen

** Positive(+) value indicates compression and negative(-) value tension

강도 45 MPa인 공시체였으나, 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 와이어 보강 공시체의 균열하중은 공시체의 콘크리트 압축강도와 관계없이 와이어 보강접수에 비례하여 증가하는 것으로 평가된다. 와이어가 3겹 보강된 35 MPa 공시체의 균열강도는 무보강 공시체의 균열강도보다 78% 높게 측정되었다. 동일한 보강 접수에 대한 45 MPa 공시체의 균열강도 증진효과는 약 59%, 55 MPa 공시체의 균열강도 증진효과는 약 55%로 측정되었다. 따라서 와이어 보강 공시체의 균열강도는 보강재인 와이어 보강접수에 비례하여 증가하는 것으로 측정되었으며, 와이어의 보강효과는 압축강도가 낮은 공시체에 대해 더욱 우수한 것으로 나타났다. 이는 구속력이 동일하게 작용되었으나 압축강도가 낮은 공시체에 작용된 구속력이 상대적으로 크게 작용되었기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 7에 와이어 보강 공시체의 최대강도와 보강접수의 관계를 도시하였으며, 직선회귀 분석한 결과도 함께 도시하였다. 3 선이 거의 동일 선상에 있는 것으로 나타나 와이어 보강 공시체의 최대강

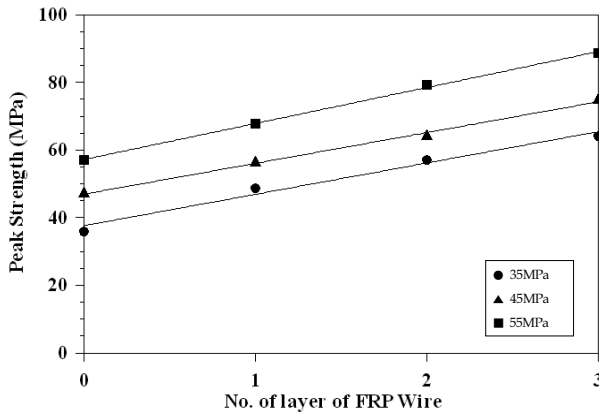


Fig. 6. Peak Strength of Concrete with an Increase in the Layer of FRP Wire

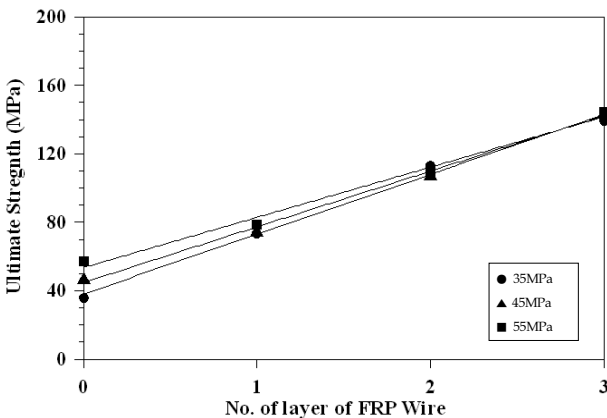


Fig. 7. Ultimate Strength of Concrete with an Increase in the Layer of FRP Wire

도는 콘크리트 압축강도와 관계없이 거의 동일하며, 보강접수에 비례하는 것으로 평가된다. 와이어가 3겹 보강된 35 MPa 공시체의 최대강도는 무보강 공시체의 압축강도보다 286% 높게 측정되었다. 동일한 보강접수에 대한 45 MPa 공시체의 최대강도 증진효과는 약 207%, 55 MPa 공시체의 최대강도 증진효과는 약 153%로 측정되었다. 동일한 와이어 보강접수에 대한 45 MPa 공시체의 최대강도 증진효과는 약 207%, 55 MPa 공시체의 최대강도 증진효과는 약 153%로 나타났다.

3.2 체적변형률 ϵ_v

체적변형률 ϵ_v 는 FRP 와이어 보강 콘크리트 공시체 실험에서 측정된 축방향변형률 ϵ_a 와 원주방향변형률 ϵ_c 의 2배의 합으로 정의된다(Pantelides and Yan 2007; Saen and Pantelides 2007). 체적변형률 ϵ_v 를 축방향변형률 ϵ_a 와 원주방향변형률 ϵ_c 의 관계식으로 나타내면, 다음과 같다.

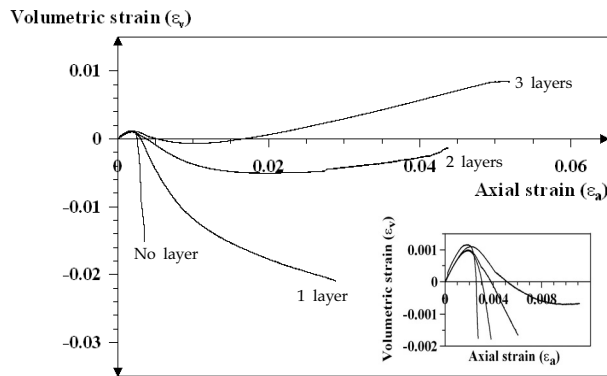
$$\epsilon_v = \epsilon_a + 2\epsilon_c \quad (1)$$

여기서 ϵ_a 와 ϵ_c 는 압축이면 양이고, 인장이면 음이다. 식 (1)의 ϵ_v 가 양이면 FRP 와이어 보강 콘크리트 공시체의 체적은 수축을 의미하며, 음이면 팽창을 의미한다. 무보강 콘크리트 공시체와 와이어 보강 콘크리트 공시체의 압축실험에서 측정된 체적변형률 ϵ_v 와 축방향변형률 ϵ_a 를 Fig. 8에 비교하였다. 그림의 (a), (b), (c)는 각각 콘크리트 압축강도가 35, 45, 55 MPa인 와이어 보강 공시체의 실험결과이다.

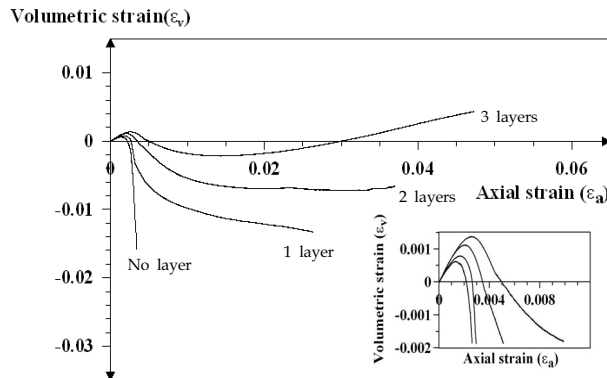
체적변형률—축방향변형률($\epsilon_v - \epsilon_a$) 선도의 초기구간에서 무보강 공시체와 FRP 와이어 보강 공시체는 압축력을 받아 수축하며, 체적변형률은 양으로 나타났다. 이 구간에서 체적변형률과 축방향변형률의 관계는 포이송비와 밀접한 관계가 있다. 체적변형률이 최대에 도달할 때까지 무보강 공시체와 와이어 보강 공시체의 체적변형률—축방향변형률 선도는 거의 일치하며, 와이어에 의한 보강 효과가 거의 없는 것으로 평가된다. 체적변형률이 최대에 도달한 후, FRP 와이어 보강접수가 많이 사용되었을수록 체적변형률의 감소 속도는 둔화되어 와이어에 의한 보강 효과가 나타나기 시작한다.

체적변형률이 “0”에 도달하면, 무보강 공시체와 와이어 보강 공시체는 팽창하기 시작하며, 이 때의 체적변형률을 제로체적변형률 ϵ_{v0} 라 정의하였다. Fig. 8에 도시된 바와 같이, 무보강 공시체의 횡방향 구속은 쉽지 않았으나, 와이어는 내부 콘크리트의 팽창을 구속시켜 와이어 보강 공시체의 제로체적변형률 도달 축방향변형률 ϵ_a 와 제로체적변형률 도달 강도 f_c 는 증가시켰다. 참고로 제로체적변형률 도달 축방향변형률은 3.1절에서 언급한 균열강도 도달

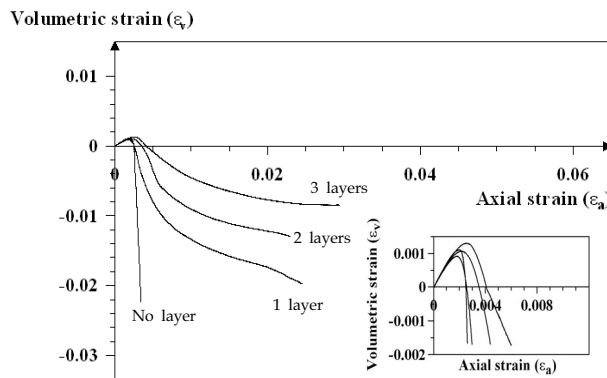
축방형변형률이며, 체로체적변형률 도달 강도는 균열강도와 동일하다. 체적변형률이 양인 구간(수축상태)의 체적변형률-축방형변형률 선도를 확대하여 Fig. 8의 내부에 도시하였다. 와이어에 의해 내부 콘크리트의 팽창이 구속되어 와이어 보강접수가 증가할수록 체로체적변형률 도달이 지연되는 상황을 Fig. 8의 내부 그림은 잘 묘사하고 있다. 와이어 보강 공시체 압축실험에서 체로체적변형률 도달 축방형변형률 ϵ_{avo} 는 0.00253~0.00579으로 측정되었다.



(a) 35 MPa



(b) 45 MPa



(c) 55 MPa

Fig. 8. Volumetric and Axial Strains of Concrete Confined with FRP Wire

이는 FSP 보강 콘크리트 공시체 실험(조백순 등, 2011)에서 측정된 0.00149~0.00252과 Saenz and Pantelides(2007)의 연구결과인 0.00206보다 큰 것으로 나타나 FRP 와이어의 콘크리트 공시체에 대한 보강효과가 우수한 것으로 평가된다.

체로체적변형률 도달 후 축방형변형률이 증가할수록 팽창이 제어되지 않은 무보강 공시체의 체적변형률은 지속적으로 감소하였다. 참고로 체적변형률이 음이면 공시체의 체적은 증가하였음을 의미한다. FRP 와이어 1겹이 보강된 35 MPa 공시체는 무보강 공시체의 압축강도보다 높은 응력에서 수축에서 팽창으로 변환하였다. 파괴에 도달할 때까지 팽창은 지속적으로 증가하였으나 와이어에 의해 팽창 증가 속도는 감소하였다. 와이어 2겹 보강된 공시체는 팽창 증가 속도가 감소하였을 뿐 아니라 팽창이 증가에서 감소로 변환되었으나, 공시체는 팽창상태에서 파괴되었다. 와이어가 3겹 보강된 공시체는 팽창이 수축으로 변환하였으며, 공시체는 수축상태에서 파괴되었다. 와이어 1겹과 2겹이 보강된 45 MPa 공시체는 파괴에 도달할 때까지 팽창상태를 유지하였으나, 3겹이 보강된 공시체는 팽창이 수축으로 변환되어 수축상태에서 파괴되었다. 그러나 55 MPa인 공시체는 파괴에 도달할 때까지 팽창상태를 유지하였다. 팽창이 수축으로 변환한 와이어 3겹이 보강된 35 MPa과 45MPa 공시체의 최대강도는 무보강 공시체의 압축강도보다 3.86과 3.07배 큰 것으로 측정되었다. 이 결과는 팽창이 수축으로 변환되는 무보강 공시체의 압축강도 대비 보강 공시체의 최대강도 비를 2.1로 제시한 Mirmiran and Shahawy(1997)보다 다소 높은 것으로 평가되었다.

3.3 FRP 와이어 보강 공시체의 파괴

FRP 와이어 보강 콘크리트 공시체는 와이어 보강접수에 따라 달리 파괴되었다. 와이어가 1겹 보강된 공시체는 시편 높이 중앙부의 팽창으로 중앙부에 위치한 와이어가 한 곳에서 절단되어 콘크리트 모체에 부착되지 않은 와이어가 탈락되면서 급작스럽게 파괴되었다(Fig. 9(a) 참조). 와이어가 2겹 또는 3겹 보강된 공시체는 시편 높이 중앙부에 위치한 와이어가 여러 곳에서 절단되어 와이어가 탈락되면서 급작스럽게 파괴되었다(Fig. 9(b) 참조).



(a) 1 Layer of FRP Wire

(b) 2-3 Layers of FRP Wire

Fig. 9. Failure Modes of Concrete Cylinders Confined with FRP Wire

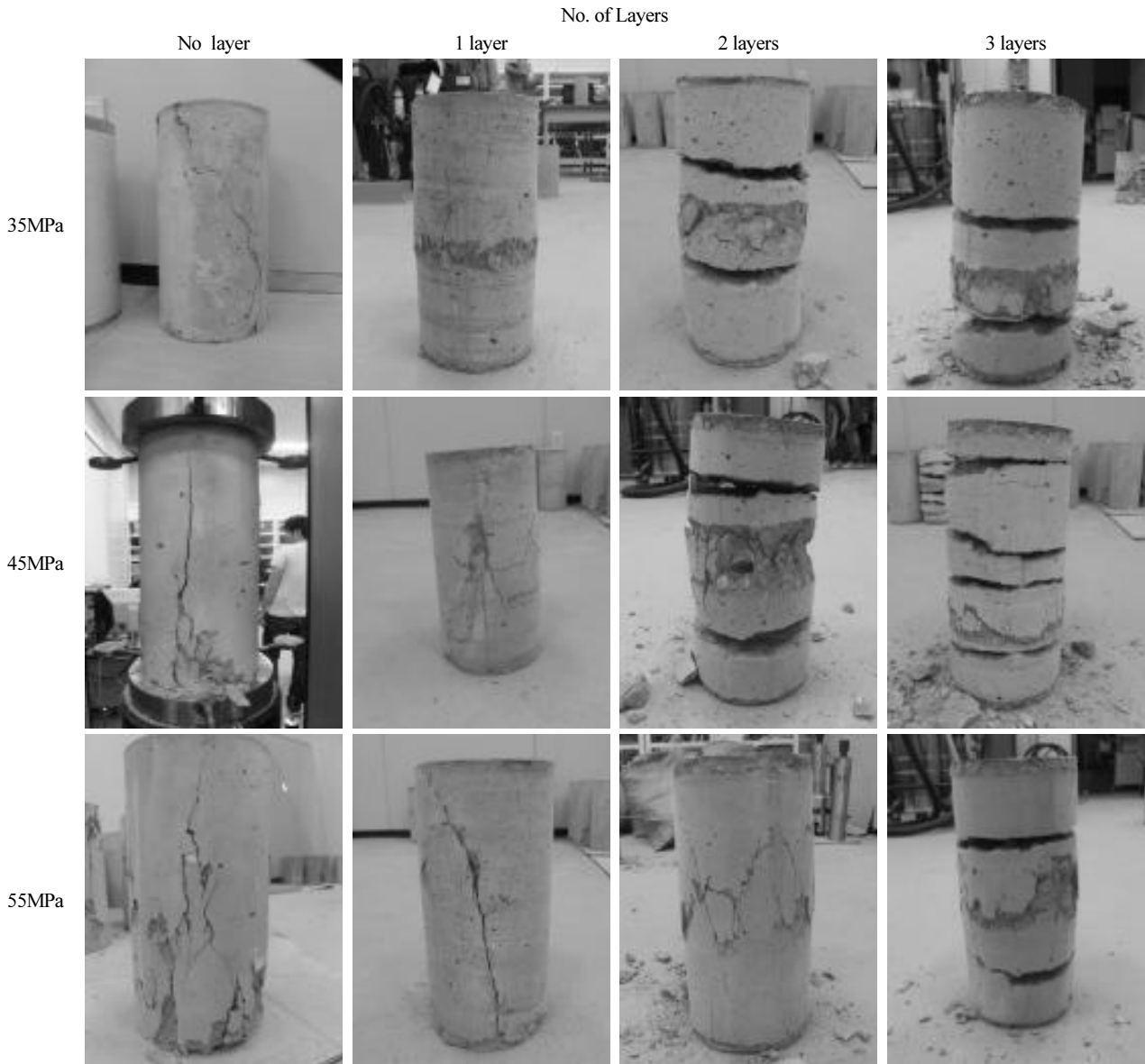


Fig. 10. Failure Modes of the Concrete Confined with FRP Wire

FRP 와이어 보강 공시체의 내부 콘크리트 파괴형태는 i) 수직균열 또는 경사균열파괴; ii) 수평균열파괴로 구분되었다. 수직균열 또는 경사균열파괴는 무보강 공시체 또는 와이어에 의한 구속력이 약한 공시체(와이어 1겹이 보강된 55 MPa 공시체)에서 발생하는 파괴형태이다(Fig. 10 참조). 수평균열파괴는 와이어에 의한 구속 약화로 인하여 갑자기 내부 콘크리트가 팽창하는 부분과 와이어가 아직 내부 콘크리트를 효과적으로 구속하는 부분의 전단효과로 발생한다. 수평균열은 공시체의 중앙부를 기준으로 여러 면으로 발생 가능하며, 와이어에 의한 구속효과가 우수한 공시체(와이어가 3겹 보강된 공시체)에 발생한다.

4. FRP 와이어의 구속

4.1 구속효과

횡방향으로 구속된 콘크리트 압축부재의 최대강도를 평가하는 일반적인 제안식은 다음과 같다.

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + k_1 \frac{f_l}{f_{co}} \quad (2)$$

여기서 f_{cc} 는 무보강 공시체의 압축강도이며, k_1 은 보강재에

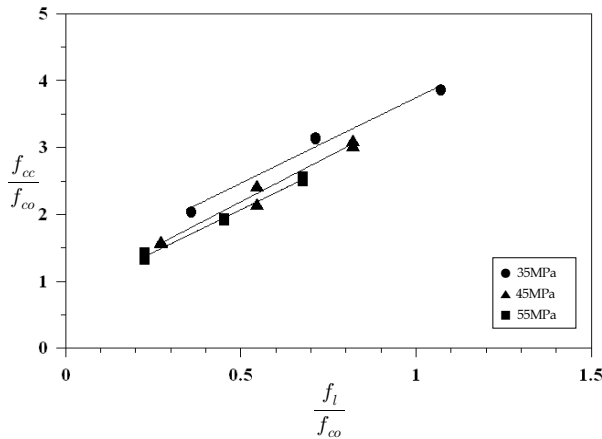


Fig. 11. Effective Confinement Constant (k_1) for the Concrete Confined with FRP Wire

의한 유효 구속 상수이며, f_l 은 보강재에 의한 횡방향 구속력이다. 식 (2)는 Richart et al.에 의해 1928년 소개되었다. Fardis and Khalili(1982)는 이 제안식을 FRP 시트 보강 콘크리트 압축부재에 적용할 수 있다고 제안하였다. Richart et al.(1928)은 능동적으로 횡보강된(actively confined) 압축부재에 대한 k_1 을 4.1로 제안하였다. Miyauchi et al.(1999)은 FRP 시트 보강 콘크리트 압축부재에 대한 k_1 을 2.98로 제안하였다. 또 다른 제안식에서 k_1 은 $\frac{f_l}{f_{co}}$ 의 함수(Karbhari and Gao, 1997; Saafi et al., 1999; Tautanji, 1999) 또는 f_l 의 함수(Samaan et al., 1998)로 제안하였다.

FRP 와이어 보강 공시체 압축실험에서 측정된 구속비($\frac{f_{cc}}{f_{co}}$)를 Table 2에 나타내었으며, 회귀분석결과를 Fig. 11에 도시하였다. 35 MPa 공시체의 FRP 와이어 유효구속상수 k_1 은 2.557, 45 MPa 공시체의 k_1 은 2.714, 55 MPa 공시체의 k_1 은 2.552로 평가되었다. 즉, 와이어에 의한 구속효과는 공시체의 압축강도와 관계가 없는 것으로 평가되었다. 이 연구에서 실시한 모든 FRP 와이어 보강 공시체 실험에서 측정된 평균 k_1 은 2.608로 평가되었다. Lam and Teng(2002)은 FRP 보강 압축부재의 실험에서 k_1 을 2.0으로 안전측으로 제안하였으나, 평균은 2.62로 보고하였다. 그러므로, 이 연구에서 사용된 FRP 와이어 보강 공시체 압축실험에서 측정된 k_1 은 보고된 FRP 시트 보강 공시체의 실험결과와 잘 맞는 것으로 평가할 수 있다.

4.2 유효 FRP 와이어 파단변형률

Xiao and Wu(2000), Moran and Pantelides(2002), Lam and Teng(2003), Matthys et al.(2005), Caret and Foster(2010) 등의 연구결과 FRP 파단변형률은 FRP 최대인장변형률의 50~60%으

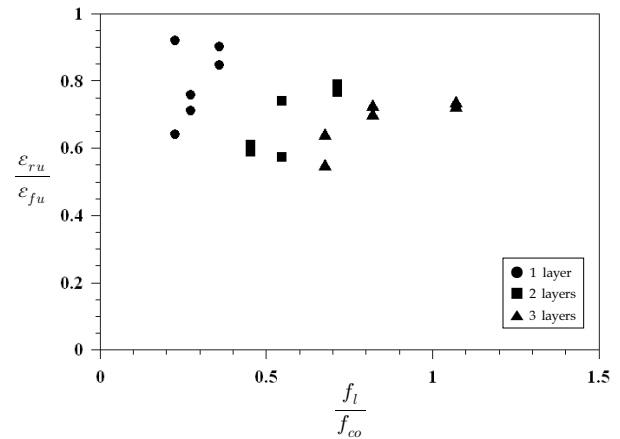


Fig. 12. Ratio of the Fracture Strain to the Maximum Tensile Strain of FRP Wire

로 보고하였다. 조백순 등(2011)의 CFSP 보강 콘크리트 공시체에서 측정된 CFSP의 파단변형률은 평균 0.01269, GFSP 보강 콘크리트 공시체에서 측정된 GFSP의 파단변형률은 평균 0.01148로 보고하였다. FRP 보강 콘크리트 압축부재 실험에서 측정된 FRP 파단변형률은 FRP 인장재료시험에서 측정된 최대인장변형률보다 작은 것은 일반화된 사실이다. 그 이유는 다음과 같다(Teng and Lam 2004; Carey and Harries 2005; Matthys et al. 2005; Pantelides and Yan 2007; Saenz and Pantelides 2007). i) 콘크리트 모재의 균열은 FRP에 응력을 집중시켜 FRP의 조기탈락을 유발시킨다; ii) 콘크리트 모재에 부착된 FRP의 곡률효과를 유발시킨다. FRP는 콘크리트 모재와 부착된 상태로 이 연구에서 사용한 FRP 와이어는 콘크리트와 와이어 사이에 접착제를 사용하지 않아 부착이 이루어지지 않았다. 단지 마찰만 존재할 뿐이다. 균열된 콘크리트의 응력과 다른 부분의 응력 차이가 마찰력보다 크다면, 와이어에는 응력이 재분배될 것이며, 와이어에 작용된 최대응력은 감소될 것이다. 와이어에 인장력이 작용할수록 마찰력은 증가하기 때문에, 어떤 한계에 도달하면, 마찰력은 더 이상 와이어에서 응력 재분배를 할 수 없다. 응력집중현상으로 결국 와이어는 파단될 것이다. 따라서 와이어에 i)은 부분적으로 적용할 수 있지만, ii)의 적용은 쉽지 않다. 와이어 최대인장변형률에 대한 파단변형률의 비를 Fig. 12에 나타내었다. 와이어 보강접수 그리고 콘크리트 압축강도가 증가할수록 FRP 와이어 파단변형률은 감소하였다. FRP 와이어 보강 공시체 압축실험에서 와이어 최대파단변형률에 대한 인장파단변형률의 비가 55-90%로 측정되었으며, 평균 69.5%로 나타났다. 이는 일반 FRP 시트 보강 공시체 실험에서 측정된 시트 파단변형률보다 다소 높은 값으로 FRP 와이어 보강 공법의 우수성을 입증한다.

5. 결론

FRP 와이어 보강 콘크리트 공시체의 압축실험에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) FRP 와이어 보강 공시체의 응력-축방향변형률 선도와 응력-원주방향변형률 선도는 균열강도 f_c 도달 후, 파괴에 도달할 때까지 응력은 지속적으로 증가하여 응력상승거동(stress-hardening behavior)하였으며, 선도는 균열강도를 기준으로 두 개의 직선구간으로 구성된 것으로 볼 수 있다.
- (2) FRP 와이어는 콘크리트를 구속시켜 공시체의 하중저항성능과 변형저항성능이 크게 향상시켰으며, 특히 에너지 흡수 성능을 매우 크게 향상시켰다. 균열이후구간에서 와이어 보강 공시체의 성능은 거의 와이어에 의해 결정되며, 와이어에 의한 보강효과가 탁월하게 구현되었다.
- (3) FRP 와이어 보강 공시체의 균열하중은 공시체의 콘크리트 압축강도와 관계없이 와이어 보강접수에 비례하여 증가하며, 와이어 보강 공시체의 최대강도는 콘크리트 압축강도와 관계없이 거의 동일하고 보강접수에 비례하는 것으로 평가된다.
- (4) FRP 와이어 3겹이 보강된 35와 45 MPa 공시체의 체적거동은 팽창에서 수축으로 변환하여 수축상태에서 파괴되었다.
- (5) FRP 와이어가 1겹 보강된 공시체는 시편 높이 중앙부의 팽창으로 중앙부에 위치한 와이어가 한 곳에서 절단되어 콘크리트 모재에 부착되지 않은 와이어가 탈락되면서 급작스럽게 파괴되었다. 와이어가 2겹 또는 3겹 보강된 공시체는 시편 높이 중앙부에 위치한 와이어가 여러 곳에서 절단되어 와이어가 탈락되면서 급작스럽게 파괴되었다. 무보강 또는 와이어에 의한 구속력이 약한 공시체의 내부 콘크리트는 수직균열 또는 경사균열로 파괴되었다. 수평균열파괴는 와이어에 의한 구속약화로 인하여 갑자기 내부 콘크리트가 팽창하는 부분과 와이어가 아직 내부 콘크리트를 효과적으로 구속하는 부분의 전단효과로 발생하였으며, 수평균열은 공시체의 중앙부를 기준으로 여러면으로 발생하였으며, 와이어에 의한 구속효과가 우수한 공시체에 발생하였다.
- (6) 35 MPa 공시체의 FRP 와이어 유효구속상수 k_1 은 2.777, 45 MPa 공시체의 k_1 은 2.460, 55 MPa 공시체의 k_1 은 2.096으로 평가되었다. 즉, 공시체의 압축강도가 낮을수록 구속효과가 우수한 것으로 평가되었다. FRP 와이어 보강접수 그리고 콘크리트 압축강도가 증가할수록 FRP 와이어 파단변형률은 감소하였다. 와이어 보강 공시체 압축실험에서 와이어 최대파단변형률에 대한 인장파단변형률의 비가 55-90%로 측정되었으며, 평균 69.5%로 나타났다. 이는 일반 FRP 시트 보강 공시체

실험에서 측정된 시트 파단변형률보다 다소 높은 값으로 FRP 와이어 보강 공법의 우수성을 입증한다.

감사의 글

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이며, 지원에 대해 감사를 표하는 바입니다(No. 2011-0023281).

References

- Bencardino, F., Spadea, G. and Swamy, N. (2002). "Strength and ductility of reinforced concrete beams externally reinforced with carbon fiber fabric." *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 2, pp. 163-171.
- Bisby, L. A., Dent, A. J. S. and Green, M. (2005). "Comparison of confinement models for fiber-reinforced polymer-wrapped concrete." *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 1, pp. 62-72.
- Brena, S. F., Bramblett, R. M., Wood, S. L. and Kreger, M. E. (2003). "Increasing flexural capacity of reinforced concrete beams using carbon fiber-reinforced polymer composites." *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 1, pp. 36-46.
- Chaallal, O., Hussan, M. and Shahawy, M. (2003). "Confinement model for axially loaded short rectangular columns strengthened with fiber-reinforced polymer wrapping." *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 2, pp. 215-221.
- Carey, S. A. and Harries, K. A. (2005). "Axial behavior and modeling of confined small-, medium-, and larger-scale circular sections with carbon fiber-reinforced polymer jacket." *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 4, pp. 596-604.
- Cho, B. S., Choi, E., Chung, Y. S. and Kim, Y. W. (2011). "Axial Load Behavior of Concrete Cylinders Confined with Fiber-Sheet and Steel-Plate Composites Plates." *Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 31, No. 4A, pp. 331-340 (in Korean).
- Cho, B. S., Kim, S. D., Back, S. Y., Choi, E. and Choi, Y. J. (2010). "Moment capacity of reinforced concrete members strengthened with FRP." *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 23, No. 03, pp. 315-323 (in Korean).
- Choi, E., Chung, Y. S., Park, J. and Cho, B. S. (2010). "Behavior of reinforced concrete columns confined by new steel-jacketing method." *ACI Structural Journal*, Vol. 107, No. 6, pp. 654-662.
- Choi, E., Park, J., Nam, T. H. and Yoon, S. J. (2009). "A new steel jacketing method for rc columns." *Magazine of Concrete Research*, Vol. 61, No. 10, pp. 787-796.
- Demers, M. and Naela, K. W. (1999). "Confinement of reinforced concrete columns with fibre-reinforced composite sheets—an experimental study." *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 26, pp. 226-241.
- El-Refae, S. A., Ashour, A. F. and Garrity, S. W. (2003). "Sagging and hogging strengthening of continuous reinforced concrete

- beams using carbon fiber-reinforced polymer sheets." *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 4, pp. 446-453.
- Harries, K. A. and Carey, S. A. (2003). "Shape and gap effects on the behavior of variably confined concrete." *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 881-890.
- Harries, K. A. and Kharel, G. (2002). "Behavior and modeling of concrete subject to variable confining pressure." *ACI Material Journal*, Vol. 99, No. 2, pp. 180-189.
- Lam, L. and Teng, J. G. (2002). "Strength models for fiber-reinforced plastic-confined concrete." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, No. 5, pp. 612-623.
- Lam, L. and Teng, J. G. (2003). "Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete." *Construction and Building Materials*, Vol. 17, pp. 471-489.
- Matthys, S., Toutanji, H., Audenaert, K. and Taerwe, L. (2005). "Axial load behavior of larger-scale columns confined with fiber-reinforced polymer composite." *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 2, pp. 258-267.
- Mirmiran, A. and Shahawy, M. (1997). "Behavior of concrete confined by fiber composites." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 5, pp. 583-590.
- Moran, D. A. and Pantelides, C. P. (2002). "Stress-strain model for fiber-reinforced polymer-confined concrete." *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 6, No. 4, pp. 233-240.
- Pantelides, C. P. and Yan, Z. (2007). "Confined model of concrete with externally bonded FRP jackets or posttensioned FRP shells." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 9, pp. 1288-1296.
- Richart, F. E., Brandtzaeg, A. and Brown, R. L. (1928). *A study of the failure of concrete under combined compressive stresses*, Bulletin No. 185, Engineering Experiment Station, University of Illinois at Urbana Champaign, Illinois.
- Saenz, N. and Pantelides, C. P. (2007). "Strain-based confinement model for FRP-confined concrete." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 6, pp. 825-833.
- Spoelstra, M. R. and Monti, G. (1999). "FRP-confined concrete model." *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 3, No. 3, pp. 143-150.
- Tautanji, H. A. (1999). "Stress-strain characteristic of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheet." *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No. 3, pp. 397-404.
- Teng, J. G. and Lam, L. (2004). "Behavior and modeling of fiber reinforced polymer-confined concrete." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 11, pp. 1713-1723.
- Xiao, Y. and Ma, R. (1997). "Seismic retrofit of RC circular columns using prefabricated composite jacketing." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 1, pp. 1357-1364.
- Xiao, Y. and Wu, H. (2000). "Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets." *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 12, No. 2, pp. 139-146.